



Inhalt

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Der »Wirkungsgrad« bei der Erzeugung künstlichen Lichts | 2 |
| 2 | Lichtquanten – zweierlei Maß | 3 |
| 3 | Lichtquantität – wie viel Licht für meinen Strom? | 5 |
| 4 | Lichtrichtung – wie viel wohin? | 6 |
| 5 | Anwendungs-Beispiel | 9 |
| 6 | Leuchtdichte – wie viel kommt zurück? | 9 |
| 7 | Lichtqualität – Lichtfarbe, Farbtemperatur und Farbwiedergabe-Index | 10 |
| 8 | Zusammenfassung – lichttechnische Größen im Überblick | 12 |

Zur Bestimmung der Effizienz
in der Lichttechnik

In der betrieblichen Praxis finden zwei physikalische Grundprinzipien der »feinen Art« ihre Umsetzung, um auf effiziente Weise Licht zu erzeugen: Die traditionellen Leuchtstofflampen, bei denen ein Gas dadurch zum Leuchten gebracht wird, dass man es zwingt, zu einem elektrischen Leiter zu werden (Bild 1), und die neuen, auf Halbleitern basierenden Leuchtdioden (Licht emittierende Dioden – LED, Bild 2).



Bild 1: Kaltstrahler traditionell – Leuchtstofflampen erzeugen bislang noch den größten Teil des künstlichen Lichts



Bild 2: Kaltstrahler modern – auf einigen Gebieten überholt inzwischen die Halbleiter-Methode: LED

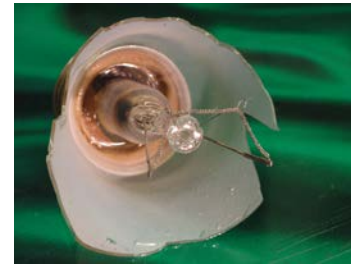


Bild 3: Klassischer Temperaturstrahler: Innenleben einer Allgebrauchs-Glühlampe 230 V; 100 W

Die Urform der Erzeugung elektrischen Lichts stellt im Vergleich hierzu eine »Holzhammer-Methode« dar: Man erwärmt etwas so stark, dass es hinreichend hell glüht. Es entsteht ein so genannter »Temperaturstrahler« in Form der Glühlampe (Bild 3). Allerdings war auch diese zur Zeit ihrer Erfindung ihren Vorgängerinnen – Kerzen, Fackeln, Petroleumlampen – in der Effizienz schon um einen so großen Schritt überlegen, wie er kein zweites Mal mehr wird vollzogen werden können, da dies Wirkungsgraden weit über 100% entspräche. So dicht unter dem Gipfel befinden wir uns inzwischen.

1 Der »Wirkungsgrad« bei der Erzeugung künstlichen Lichts

Licht ist eine Form von Energie. Bei der Umwandlung von Energie entstehen Verluste, ausgedrückt im Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad technischer Geräte und Vorgänge wird gewöhnlich als Quotient von Ausgangsleistung durch Eingangsleistung in Prozent angegeben. Nur beim Licht mag das nicht so recht funktionieren, da das menschliche Auge bezüglich der wahrgenommenen Helligkeit für verschiedene Farben unterschiedlich empfindlich ist. Deshalb ist in die Einheit für die Lichtleistung eines Leuchtmittels die Empfindlichkeit eines genormten »Durchschnittsauges« bereits eingearbeitet. Diese Einheit nennt sich Lumen [lm] (schlicht und ergreifend das lateinische Wort für Licht). Somit muss der Wirkungsgrad elektrischer Lampen, Leuchten und Leuchtmittel in Lumen pro Watt [lm/W] angegeben werden und nennt sich »Lichtausbeute«. Diese und nur diese Angabe ist also geeignet zu beurteilen, welches technische Gerät die größte wahrgenommene Helligkeit je aufgenommener elektrischer Leistung erzeugt.

Das Licht stellt dabei definitionsgemäß das sichtbare Spektrum elektromagnetischer Strahlung dar. Es wird zwar mitunter auch von ultraviolettem und infrarotem Licht gesprochen, doch ebenso gut könnte man von dreieckigen und viereckigen Kreisen sprechen. Der allgemeine Ausdruck »Strahlung« ist hier der einzig richtige. Gelten lassen könnte man

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

allenfalls noch den volkstümlichen Ausdruck »Schwarzlicht« für UV-Strahlung, die auf Stoffe fällt, auf denen sie in sichtbare Strahlung umgewandelt wird.

2 Lichtquanten – zweierlei Maß

Das sichtbare Spektrum beinhaltet nur einen relativ kleinen Ausschnitt aus dem sehr weiten Bereich elektromagnetischer Strahlung, die vom Langwellen-Rundfunksender 155 kHz (1930 m) bis zur kosmischen Höhenstrahlung im Bereich von 10^{23} Hz (10^{-15} m) reicht. Während die Bemessung von Schwingungen an Hand der Frequenz (Anzahl Schwingungen pro Sekunde – Hertz [Hz]) im Allgemeinen die üblichere Angabe ist, hat es sich eingebürgert, das sichtbare Licht (also *das* Licht; »sichtbares Licht« entspräche eigentlich einem runden Kreis) mittels seiner Wellenlänge zu bemessen. Das macht aber nichts, da man die eine Größe in die andere umrechnen kann, indem man die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Frequenz teilt und dann die Wellenlänge erhält. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei immer die Lichtgeschwindigkeit, die mit annähernd 300 000 km/s bekanntlich ziemlich hoch ist.

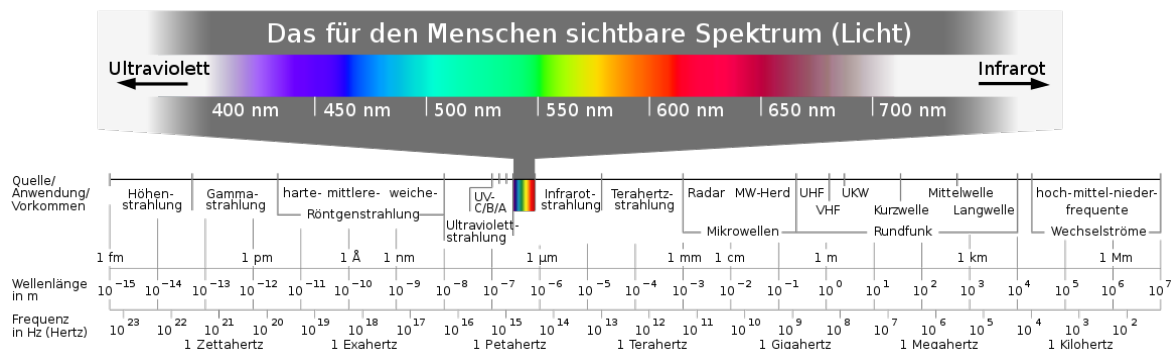


Bild 4: Der sichtbare Bereich nimmt nur einen kleinen Ausschnitt aus dem gesamten Spektrum elektromagnetischer Strahlung ein

(Bild: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/62/Electromagnetic_spectrum_-_de_c.svg/1176px-Electromagnetic_spectrum_-_de_c.svg.png)

Der sichtbare Bereich elektromagnetischer Strahlung beginnt bei einer Frequenz von etwa 384 THz (Terahertz; Billionen Schwingungen pro Sekunde) bzw. einer Wellenlänge von 780 nm (Nanometer; Milliardstel Meter) mit roter Farbe und endet beim Violett mit 789 THz, entsprechend 380 nm. Dies umfasst also ein Verhältnis von kaum mehr als 1:2 (Bild 4). Zum Vergleich: Hörbare akustische Schwingungen, der Schall, erstrecken sich von rund 50 Hz bis knapp 20 kHz und umfassen damit schon ein Verhältnis von 1:400. Der Bereich sichtbarer Strahlung liegt aber ungefähr um den Punkt, an dem auch die Strahlung der Sonne am intensivsten ist – was evolutionsgeschichtlich kaum ein Zufall sein dürfte. Natürlich wäre es ganz reizvoll, bei Nacht auch infrarote Strahlung sehen zu können. Um das zu leisten, was entsprechende Kameras können, müsste jedoch der sichtbare Bereich ziemlich weit ins langwellige Infrarot hinein reichen. Schließlich strahlt ein menschlicher Körper mit einer »Farbtemperatur« (Abschnitt 7) von genau 310 K.

Ein weiterer Unterschied in unserem Umgang mit Licht und Schall ist, dass wir für den Schalldruckpegel eine logarithmische Skala eingeführt haben, da unser subjektives Empfinden für Lautstärke logarithmisch verläuft. Dies gilt zwar ebenso für Helligkeit, aber diese messen wir in linearen Lumen bzw. Lux [lx]. Bedenken wir, dass für Büroräume eine Beleuchtungsstärke von 500 lx [lm/m^2] gefordert wird, der Sonnenschein uns aber schon 100 000 lx beschert, während wir uns bei Vollmond mit nur 0,2 lx schon sehr gut orientieren

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

können und selbst bei 0,0001 lx noch etwas erkennen. Selbst die Helligkeit des Vollmonds stellt also nur 2 ppm (parts per million; Milli-Promille, sozusagen) des Sonnenscheins dar. Eine stark bewölkte oder bedeckte Wetterlage, wie sie für den November als typisch angesehen wird, aber im gesamten Winter immer wieder vorkommt, weist nur 1 000 lx auf, also nur 1% des Sonnenscheins. So dunkel erscheint uns dies nun auch wieder nicht. Somit zieht sich der wahrnehmbare Helligkeitsbereich, fast wie der Schalldruckpegel, über 9 Größenordnungen hin. Damit konvergiert der in der Effizienzdebatte geführte Kampf um das letzte Lumen pro Watt irgendwann gegen einen Streit um Kaisers Bart. Die Frage, in welchen Anwendungsfällen denn halb so viele Lux auch noch ausreichen würden, könnte zum Teil wesentlich größere Sparpotenziale erschließen.

| Wellenlänge | Homogene Strahlung | | Warmstrahler 6000 K (Sonne) | | Monochromatisch grün | |
|--------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|
| | Strahlungsleistung | Lichtstrom | Strahlungsleistung | Lichtstrom | Strahlungsleistung | Lichtstrom |
| 380 nm | 0,1000 W | 0,003 lm | 0,0057 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 420 nm | 0,1000 W | 0,273 lm | 0,0116 W | 0,032 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 465 nm | 0,1000 W | 5,047 lm | 0,0210 W | 1,061 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 510 nm | 0,1000 W | 34,355 lm | 0,0329 W | 11,307 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 555 nm | 0,1000 W | 68,300 lm | 0,0462 W | 31,570 lm | 1,0000 W | 683,000 lm |
| 600 nm | 0,1000 W | 43,097 lm | 0,0598 W | 25,791 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 645 nm | 0,1000 W | 9,439 lm | 0,0728 W | 6,873 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 690 nm | 0,1000 W | 0,561 lm | 0,0844 W | 0,473 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 735 nm | 0,1000 W | 0,025 lm | 0,0942 W | 0,023 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 780 nm | 0,1000 W | 0,001 lm | 0,1021 W | 0,001 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| Summe | 1,0000 W | 161,101 lm | 0,5309 W | 77,133 lm | 1,0000 W | 683,000 lm |

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen (physikalischer, gemessener) Strahlungsleistung in Watt und vom Menschen wahrgenommener Lichtleistung in Lumen am vereinfachten Modell mit 10 Messwerten auf 10 Wellenlängen, also 10 Farben

Während die Physiker sich nach wie vor nicht einig sind, ob es sich beim Licht um Wellen oder Teilchen handelt, da es von beidem charakteristische Merkmale aufweist, kommen die Techniker mit der bestehenden Modellvorstellung vom Licht glänzend zurecht. Daran lassen sich lückenlos alle Beobachtungen erklären, und so lässt sich damit arbeiten. Ein für die Beleuchtungstechnik wichtiger Aspekt ist hierbei, dass Licht – jedenfalls bei Betrachtung einer bestimmten Wellenlänge bzw. Frequenz – gequantelt vorkommt, also als ganzzahlige Vielfache einer Naturkonstanten, des Planck'schen Wirkungsquantums h (Tabelle 2). Die Energie eines Lichtquants entspricht dem Produkt aus seiner Frequenz und dem Planck'schen Wirkungsquantum.

Das bedeutet aber auch: Ein Lichtquant lässt sich sozusagen »herunter bremsen«, so dass aus einem kurzwelligem Strahlungsquant ein längerwelliges wird. Die Energie-Differenz wird dabei, wie üblich, als Wärme »verbremst« (Bild 5). Dieser Effekt wird z. B. bei der Leuchtstofflampe ausgenutzt, bei der die eigentliche Gas-Entladung ausschließlich UV-Strahlung erzeugt, die den Leuchtstoff zum Leuchten anregt. Jedes Strahlungsquant erzeugt darin

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

beim Auftreffen ein Lichtquant niedrigerer Energie – hoffentlich im sichtbaren Bereich. Ein Rest UV-Strahlung bleibt stets übrig. Die Methode hat aber den Vorteil, dass sich die Lichtfarbe über die Zusammensetzung des Leuchtstoffs nahezu beliebig steuern lässt.

| Frequenzen, Wellenlängen, Energie eines Lichtquants | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|
| Naturkonstanten: | f | 380 THz | 430 THz | 480 THz | 530 THz | 580 THz | 630 THz | 680 THz | 730 THz | 780 THz | |
| $c = 299792,5 \text{ km/s}$ | λ | 789 nm | 697 nm | 625 nm | 566 nm | 517 nm | 476 nm | 441 nm | 411 nm | 384 nm | |
| $\hbar = 6,260696 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ | $W = h \cdot f$ | 238 J | 269 J | 301 J | 332 J | 363 J | 394 J | 426 J | 457 J | 488 J | $\cdot 10^{-21}$ |
| $1 \text{ eV} = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$ | | 3,81 eV | 4,31 eV | 4,81 eV | 5,32 eV | 5,82 eV | 6,32 eV | 6,82 eV | 7,32 eV | 7,82 eV | |

Tabelle 2: Je höher die Frequenz eines Lichtquants (Fotons), desto kürzer die Wellenlänge und desto höher die Energie



Bild 5: Der »Quantensprung« aus Tabelle 2

Bemerkenswert ist daran weiter, dass die weiße LED heutiger Prägung ebenfalls eine Leuchtstofflampe darstellt. Prinzipiell bringt die LED hierbei, da sie primär blaues Licht statt UV-Strahlung einsetzt, die »Veranlagung« mit sich, dass

- ein Teil des blauen Lichts direkt genutzt wird und
- für den Rest der Sprung nicht so weit ist und entsprechend weniger Energie »verbremst« werden muss.

3 Lichtquantität – wie viel Licht für meinen Strom?

Theoretisch kann eine Lichtquelle eine Licht-Ausbeute, also einen Umwandlungsgrad einer anderen Form von Energie in Licht, von 683 lm/W erreichen. Dies gilt jedoch nur für monochromatisches grünes Licht von 555 nm Wellenlänge, bei der das menschliche Auge am empfindlichsten ist und wo eben »zufällig« auch gerade das Sonnenlicht sein Maximum an Strahlungsleistung aufweist. Die grünste anzunehmende Lampe ist also tatsächlich grün. Ob wir damit Straßen, Plätze, Hallen, Büros, Supermärkte und am Ende gar Wohnzimmer beleuchten wollen, erscheint – unabhängig von jeglicher politischer Gesinnung – doch mehr als fraglich.

Für »weißes« Licht – oder das, was wir als weiß empfinden, wenn man alle Farben von 380 nm bis 780 nm Wellenlänge zu gleichen Anteilen an objektiver, physikalisch gemessener Strahlungsleistung mischt – ergibt sich ein theoretisches Maximum von nur noch 182 lm/W (Tabelle 3; bzw. 161 lm/W im zum besseren Verständnis vereinfachten Modell nach Tabelle 1). Erzeugt man also ein Strahlungsspektrum, das im Bereich von 380 nm bis 780 nm z. B. auf je 1 nm eine Strahlungsleistung von je 2,5 mW umfasst, so ergibt dies

$$400 \cdot 2,5 \text{ mW} = 1 \text{ W}$$

an Licht. Dieses nähme man als einen Lichtstrom von 182 lm wahr. Hätte man dafür eine elektrisch betriebene Lichtquelle mit einem Wirkungsgrad von 100% zur Verfügung, so würde sich diese mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1 W begnügen. Ja, schön wär's – aber so furchtbar weit sind wir gar nicht davon weg. Moderne Leuchtmittel sind immerhin schon näher an einem physikalischen Wirkungsgrad von 100% als der beste neu-

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

zeitliche Dieselmotor. Die gute alte Glühlampe kann dagegen kaum der Dampflok das – von dieser (zusätzlich zur Energie) in rauen Mengen benötigte – Wasser reichen.

| Wellenlänge | Homogene Strahlung | | Warmstrahler 6000 K (Sonne) | | Monochromatisch grün | |
|--------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|
| | Strahlungsleistung | Lichtstrom | Strahlungsleistung | Lichtstrom | Strahlungsleistung | Lichtstrom |
| 380 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0001 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 381 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0001 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 382 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0001 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 383 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0001 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 555 nm | 0,0025 W | 1,708 lm | 0,0011 W | 0,775 lm | 1,0000 W | 683,000 lm |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 777 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 778 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| 779 nm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0025 W | 0,000 lm | 0,0000 W | 0,000 lm |
| Summe | 1,0000 W | 182,457 lm | 0,5244 W | 85,762 lm | 1,0000 W | 683,000 lm |

Tabelle 3: Beziehung zwischen (physikalischer, gemessener) Strahlungsleistung in Watt und vom Menschen wahrgenommener Lichtleistung in Lumen am vollständigen Modell (Auszug – Prinzip-Darstellung) mit 400 Messwerten auf 400 Wellenlängen, also 400 Farben

Geht man nicht von einem solchen theoretischen, sondern von einem real existierenden Weiß aus, wie es die Sonne als Temperaturstrahler mit einer Oberflächentemperatur von gut 5800°C (knapp 6000 K) liefert, dann sind darin die anderen Farben beiderseits des Grüns etwas schwächer, die 555-nm-Spektrallinie und diejenigen in deren unmittelbaren Umgebung dagegen etwas stärker vertreten. Bekanntlich empfinden wir dies immer noch als »weiß«, doch die theoretische Höchstgrenze des Wirkungsgrads – was bei Sonnenlicht nun 100% entspräche – steigt dadurch auf 198 lm/W an. Weil die Korrelation derart flexibel ist, also gar nicht besteht, muss man von Lichtausbeute [lm/W] statt von Wirkungsgrad [%] sprechen. Unabhängige Fachleute sehen die theoretisch höchstmögliche Lichtausbeute eines weißen Leuchtmittels bei etwa 320 lm/W. Hier könnte das Weiß noch einigermaßen »weiß« und die Farbwiedergabe akzeptabel sein – wenn denn der physikalische Wirkungsgrad der Umsetzung von elektrischer Energie in Licht bei 100% läge.¹ Manchmal wäre es angemessener, von »Wirkungsgrad« zu reden, da mit Zahlen jongliert wird, die der gezielten Verwirrung dienen.²

4 Lichtrichtung – wie viel wohin?

Sind die Zahlen in Lumen pro Watt zu klein, um damit etwas zu verkaufen, so werden vielfach andere Größen missbraucht, um die Defizite zu verschleiern und statt dessen sogar noch Eindruck zu schinden. Die erste solche Größe ist die Lichtstärke I , gemessen in Candela [cd]. Schon der Name »Lichtstärke« eignet sich zu solchen Zwecken hervorragend.

Zur Bestimmung der Effizienz
in der Lichttechnik

Das Verhältnis des Lichtstroms zur Lichtstärke gibt an, ob die betreffende Lampe stark, schwach oder überhaupt nicht fokussiert ist: Eine Lichtquelle, die ihr Licht in alle Richtungen gleichmäßig verteilt, würde es auch auf der Innenfläche einer um diese Lichtquelle herum gedachten Kugel gleichmäßig verteilen. Die Oberfläche einer Kugel errechnet sich zu:

$$A_{\text{Kugel}} = 4\pi r^2.$$

Mit Radius 1 (also Durchmesser 2) beträgt deren Oberfläche rund 12,6 – egal, welche Längeneinheit man wählt – nur muss das Flächenmaß natürlich das dem jeweiligen Längemaß entsprechende sein: Wird z. B. der Radius in Metern angegeben, so kommen selbstverständlich für die Fläche nur Quadratmeter in Betracht.

Der Raumwinkel Ω , gemessen in Steradian [sr], ist der Winkel an der Spitze des Lichtkegels, der ein kreisrundes Flächenstück an der Innenseite der Kugel beleuchtet. Nun ist aber ein Kegel ein räumliches Gebilde; daher *Raumwinkel*. Gemäß Definition ist genau dann der Raumwinkel $\Omega = 1$ sr, wenn die Grundfläche des Kegels

$$A_{\text{Kegel}} = r^2$$

ist (mit r als Höhe des Kegels gleich Radius der Kugel – Bild 6). Interessanterweise ist der Zusammenhang mit dem Lichtstrom nicht linear, auch nicht umgekehrt (reziprok) proportional, sondern erinnert doch sehr an eine negative Kosinuskurve (Bild 7). Dies ist wiederum überhaupt kein Wunder, denn die Umrechnung erfolgt nach der Formel:

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \right].$$

Darin ist ε der Ausstrahlungswinkel der Lichtquelle, also der Winkel an der Spitze des Profils des Lichtkegels. Der Zusammenhang zwischen dem »normalen« zweidimensionalen Winkel ε und dem dreidimensionalen Winkel Ω wurde in Tabelle 4 numerisch und in Bild 7 grafisch dargestellt. Einen passenden [Umrechner](#) findet man außerdem im Internet.³ Damit ein wenig zu spielen veranschaulicht die Zusammenhänge recht gut, und man erkennt:

- Beträgt $\varepsilon = 65,54^\circ$, so ist der Raumwinkel $\Omega = 1$ sr.
- Ein Lichtstrom von $\Phi = 1$ lm würde nun im Abstand von 1 m eine Fläche von 1 m² beleuchten (bei 2 m Abstand wären es schon 4 m²).
- Dies ergäbe eine Beleuchtungsstärke von $E_V = 1$ lm/m² = 1 lx (bei 2 m Abstand nur noch 0,25 lx).
- Die von der Lichtquelle ausgehende Lichtstärke ist $I = 1$ cd (bei 2 m Abstand immer noch 1 cd; bei 1000 m auch noch 1 cd).

Die Lichtstärke I_V gibt also an, welcher Lichtstrom den Kegel durchströmt. Der Elektriker mag das mit einem elektrischen Leiter vergleichen, in dem die Stromstärke am Anfang und am Ende die gleiche ist, auch wenn sich der Querschnitt dazwischen ändern sollte. Gut, ein vernünftiger Elektriker installiert keine konischen Leiter, aber zum Verständnis des Unterschieds zwischen Leuchtdichte L_V und Beleuchtungsstärke E_V mag die reine Vorstellung davon schon taugen.

Genau genommen ist der Raumwinkel Ω dimensionslos, analog zur Angabe eines zweidimensionalen Winkels im Bogenmaß, denn eigentlich hat er die Einheit [m²/m²]: Das Eine ist die beleuchtete Fläche und das Andere der quadrierte Abstand der Lichtquelle hiervon, denn die beleuchtete Fläche nimmt mit dem Quadrat des Abstands von der Lichtquelle zu. Daher

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

fällt die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat des Abstands. Wir wollen hier aber zum besseren Verständnis den Raumwinkel stets in der Einheit [sr] angeben, denn das ist so üblich.

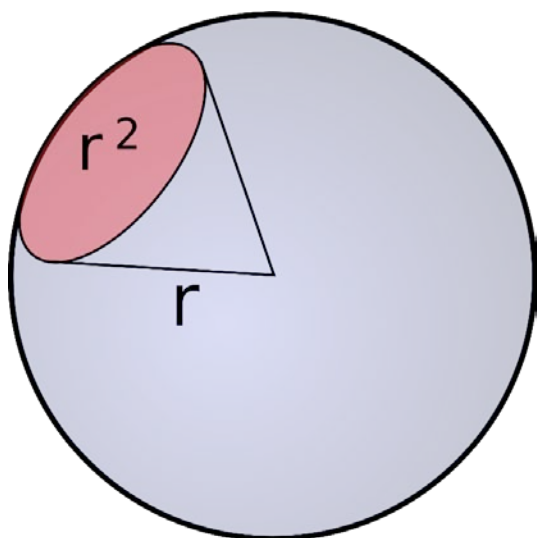


Bild 6: Zur Definition des Raumwinkels (<http://de.wikipedia.org/wiki/Steradian>)

| Raumwinkel $\Omega = 2\pi (1 - \cos(\varepsilon/2))$ und Verhältnis von Leuchtdichte I zu Lichtstrom Φ in Abhängigkeit vom Ausstrahlungswinkel ε | | | | | |
|---|-----------------|-----------------------|---------------------------|-----------|---------------|
| ε | $\varepsilon/2$ | $\cos(\varepsilon/2)$ | $1 - \cos(\varepsilon/2)$ | Ω | I/Φ |
| 0° | 0,0° | 1,0000 | 0,0000 | 0,0000sr | |
| 5° | 2,5° | 0,9990 | 0,0010 | 0,0060sr | 167,2185cd/lm |
| 10° | 5,0° | 0,9962 | 0,0038 | 0,0239sr | 41,8245cd/lm |
| 15° | 7,5° | 0,9914 | 0,0086 | 0,0538sr | 18,6034cd/lm |
| 20° | 10,0° | 0,9848 | 0,0152 | 0,0955sr | 10,4761cd/lm |
| 25° | 12,5° | 0,9763 | 0,0237 | 0,1489sr | 6,7143cd/lm |
| 30° | 15,0° | 0,9659 | 0,0341 | 0,2141sr | 4,6708cd/lm |
| 35° | 17,5° | 0,9537 | 0,0463 | 0,2908sr | 3,4387cd/lm |
| 40° | 20,0° | 0,9397 | 0,0603 | 0,3789sr | 2,6391cd/lm |
| 45° | 22,5° | 0,9239 | 0,0761 | 0,4783sr | 2,0908cd/lm |
| 60° | 30,0° | 0,8660 | 0,1340 | 0,8418sr | 1,1879cd/lm |
| 65,541° | 32,8° | 0,8408 | 0,1592 | 1,0000sr | 1,0000cd/lm |
| 75° | 37,5° | 0,7934 | 0,2066 | 1,2984sr | 0,7702cd/lm |
| 90° | 45,0° | 0,7071 | 0,2929 | 1,8403sr | 0,5434cd/lm |
| 105° | 52,5° | 0,6088 | 0,3912 | 2,4582sr | 0,4068cd/lm |
| 120° | 60,0° | 0,5000 | 0,5000 | 3,1416sr | 0,3183cd/lm |
| 150° | 75,0° | 0,2588 | 0,7412 | 4,6570sr | 0,2147cd/lm |
| 180° | 90,0° | 0,0000 | 1,0000 | 6,2832sr | 0,1592cd/lm |
| 210° | 105,0° | -0,2588 | 1,2588 | 7,9094sr | 0,1264cd/lm |
| 240° | 120,0° | -0,5000 | 1,5000 | 9,4248sr | 0,1061cd/lm |
| 270° | 135,0° | -0,7071 | 1,7071 | 10,7261sr | 0,0932cd/lm |
| 300° | 150,0° | -0,8660 | 1,8660 | 11,7246sr | 0,0853cd/lm |
| 330° | 165,0° | -0,9659 | 1,9659 | 12,3523sr | 0,0810cd/lm |
| 360° | 180,0° | -1,0000 | 2,0000 | 12,5664sr | 0,0796cd/lm |

Tabelle 4: Zuordnung von Raumwinkel Ω zum Ausstrahlungswinkel ε und Verhältnis von Lichtstärke I zu Lichtstrom Φ

Natürlich sind dies alles idealisierte Vorstellungen, die voraussetzen, dass das beleuchtete Flächenstück auf der Innenseite der Kugel wirklich kreisrund und die Beleuchtungsstärke darauf absolut homogen ist. In der Praxis wird dies höchstens näherungsweise der Fall sein. Eine scharfe Grenze zwischen dem beleuchteten und dem unbeleuchteten Bereich wird sich auch nicht identifizieren lassen. Im Rahmen dieser Ungenauigkeiten bieten diese Größen aber eine gute Gebrauchstauglichkeit zum Einschätzen dessen, wie viel Licht wohin gelangt.

Dabei beschränkt sich dies nicht allein auf kreisförmige »Spots«. Eine bestimmte Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke lässt sich auch jedem anderen Flächenstück zuordnen, innerhalb dessen diese Größen annähernd homogen verteilt sind. Statt des Kegels muss man sich dann entweder eine Pyramide vorstellen oder sich das Flächenstück als von einer Vielzahl extrem schlanker, spitzer »Einheitskegel« beleuchtet denken.

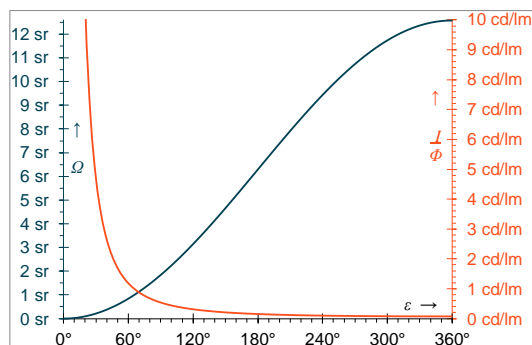


Bild 7: Raumwinkel Ω und Verhältnis von Lichtstärke I zu Lichtstrom Φ in Abhängigkeit vom Ausstrahlungswinkel ε

5 Anwendungs-Beispiel

Eine plastische Vorstellung des Gebildes fällt u. a. deswegen schwer, weil die ebene Grundfläche unseres betrachteten Lichtkegels nicht gleich groß ist wie das beleuchtete gewölbte Flächenstück auf der (inneren) Oberfläche der Kugel. Die Beleuchtungsstärke wäre zudem auf der Grundfläche des Kegels inhomogen, denn der Rand des Kreises ist weiter von der Lichtquelle entfernt als der Kreismittelpunkt und wird nicht senkrecht angestrahlt. Das gewölbte Flächenstück auf der Innenseite der Kugel ist etwas größer, aber die Beleuchtungsstärke ist stets homogen – bei jedem Winkel. Diese in Tabelle 4 und Bild 7 wiedergegebene nichtlineare Abweichung wird mit größerem Winkel immer größer. Betrachten wir beispielsweise den o. g. Ausstrahlungswinkel von etwa $65,54^\circ$, dann wird aus einem Abstand von z. B. 1 m stets ein Flächenstück von 1 m^2 beleuchtet. Die Innenseite der Einheitskugel mit 1 m Radius umfasst aber näherungsweise $12,6 \text{ m}^2$ (ganz genau gesagt $4\pi \text{ m}^2$). Hierauf verteilt sich das Licht einer ringsum strahlenden Lichtquelle gleichmäßig, also würde sich bei einem Radius von $r = 1 \text{ m}$ ein Lichtstrom von z. B. 1 lm auf $12,6 \text{ m}^2$ verteilen. Dies ergäbe eine Beleuchtungsstärke E_v von

$$E_v = \frac{1 \text{ lm}}{4\pi \text{ m}^2} \approx \frac{1 \text{ lm}}{12,6 \text{ m}^2} \approx 0,0794 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 0,0794 \text{lx} .$$

Mit einer Kugel von 1 cm Radius ergäbe sich

$$E_v \approx 0,0794 \frac{\text{lm}}{\text{cm}^2} = 794 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 794 \text{lx} .$$

Die Lichtstärke hingegen bliebe in beiden Fällen die gleiche. Sie beschreibt nur, wie viel Licht von einem Punkt in eine bestimmte Richtung ausgeht – egal, wie weit. Diese Größe hat deswegen denkbar wenig praktische Relevanz.

Strahlt die Lichtquelle nicht rundum gleichmäßig, so steigt natürlich die Intensität des Lichts dort, wohin es leuchtet, umso mehr, je kleiner der Raumwinkel und folglich die beleuchtete Fläche ist, wohin das Licht noch fällt. Bis zu dem genannten Ausstrahlungswinkel von $65,54^\circ$ sind die Zahlenwerte des Raumwinkels kleiner als 1; darüber steigen sie rapide an. Dies bedeutet aber auch, dass die Zahlenwerte für die Beleuchtungsstärke in Lux und für die Lichtstärke in Candela für größere Winkel kleiner sind als die Werte für den Lichtstrom in Lumen, da sich bei größeren Winkeln das gleiche Licht auf mehr Fläche verteilt.

Deshalb setzten Hersteller – je größer und je namhafter, desto eher – in der Vergangenheit bei Ausstrahlungswinkeln unter etwa 65° lieber die Lichtstärke oder die Beleuchtungsstärke an und verschwiegen den Lichtstrom, weil dann die größere Zahl auf der Verpackung stand. Bei großen Winkeln gab man schon immer lieber den Lichtstrom an. Heute ist bei Leuchtmitteln für die Allgemeinbeleuchtung durch EU-Verordnungen geregelt, was anzugeben ist. In Nischen wie z. B. bei Fahrradleuchten wird »die« (welche?) Beleuchtungsstärke angegeben und dabei »vergessen« zu erwähnen, auf welchen Abstand diese Angabe sich denn nun bezieht.

6 Leuchtdichte – wie viel kommt zurück?

Man kann die Lichtstärke auch benutzen um anzugeben, wie viel Licht von einem bestimmten Flächenstück ausgeht. So gelangt man zur davon abgeleiteten Leuchtdichte L_v [cd/m^2]. Diese eignet sich sowohl zur Bestimmung, wie viel Licht von einer Fläche reflektiert wird, als auch zur Beurteilung selbst leuchtender Flächen, etwa von Bildschirmen.

7 Lichtqualität: Lichtfarbe, Farbtemperatur und Farbwiedergabe-Index

Nun glüht ein jeder Körper, gleichgültig aus welchem Material, bei gleicher Temperatur immer gleich hell und mit der gleichen Farbzusammensetzung. Dies bietet die Möglichkeit, die farbliche Zusammensetzung künstlichen Lichts an Hand seiner »Farbtemperatur« zu beschreiben. Wenn also das Licht einer Lampe den Eindruck von »Tageslichtweiß« erweckt, nennt man dies »eine Farbtemperatur von 5800 K«, denn dies ist die Oberflächen-Temperatur der Sonne. Was jedoch bei den entsprechenden Angaben auf dem Markt niemals erwähnt wurde, bis die EU es vorschrieb: Auch dies stellt nur einen ganz groben Richtwert dar. In der Atmosphäre werden verschiedene Farben verschieden gebrochen, gestreut oder absorbiert. So kommt an der Erdoberfläche denn doch wieder ein diskontinuierliches Spektrum an (Bild 8), das noch dazu tageszeitlich stark schwankt. Tageslicht ist nicht gleich Sonnenlicht. Man muss also wieder ein bestimmtes, typisches Tageslicht-Spektrum normativ festlegen. Richtig hätte es also bei allen Angaben zur Farbtemperatur schon immer z. B. heißen müssen: »ähnlich 5800 K«. So ist es nun endlich auch per Verordnung festgelegt.

Nur die Glühlampe kann ein kontinuierliches Spektrum wie die Sonne aufweisen. Allerdings schmilzt Wolfram bei 3407°C (3680 K), so dass eine Farbtemperatur (die hier – und nur hier, also nur bei der Glühlampe und bei der Sonne – exakt mit der Oberflächentemperatur der strahlenden Fläche korreliert) von etwa 3000 K kaum überschritten werden kann. Ein bisschen Reserve muss noch sein, schon allein wegen Spannungsschwankungen im Stromnetz, wegen der Einschaltströme, auf Grund der Fertigungs-Toleranzen und zu Gunsten der Lebensdauer.

Jedoch muss weißes Licht nicht notwendigerweise aus allen Farben des sichtbaren Spektrums bestehen, noch nicht einmal aus dreien, wie vielfach angenommen wird. Nein, es reichen unter Umständen zwei Farben aus, um daraus den Eindruck von »weiß« zu erzeugen. Dies geht zwar auf die Kosten der Lichtqualität, sprich der Farbwiedergabe, denn eine Farbe, die im Licht nicht enthalten ist, kann auch von dem beleuchteten Objekt nicht reflektiert werden. Doch bietet diese Eigenschaft die Möglichkeit, bestimmten Lichtquellen traumhaft hohe Lichtausbeuten zuzuschreiben – sofern es gelingt, sich um Aussagen zur Lichtqualität zu drücken. Davon abgesehen sind die bestehenden Maße für die Lichtqualität von äußerst fragwürdiger Natur, von Kautschuk artiger Beschaffenheit und bedürften dringend einer Revision, aber niemand ist daran so recht interessiert.

Dies gilt auch für den Farbwiedergabe-Index. Dessen Herleitung und Definition sind kompliziert und würden hier den Rahmen sprengen, doch so viel wissen wir: Wenn ein Leuchtmittel einen Farbwiedergabe-Index $R_a = 100$ hat, hat es eine ideale Farbwiedergabe, richtig? – Nicht unbedingt! Denn auch der Farbwiedergabe-Index ist eine relative Größe. Bei Farbtemperaturen unter 5000 K bezieht er sich auf die jeweils angegebene Farbtemperatur des jeweiligen Leuchtmittels, ab 5000 K auf das Tageslicht. Nur deshalb lassen sich Lichtquellen verschiedener Farbtemperaturen hinsichtlich ihrer Farbwiedergabe vergleichen. Eine Lichtquelle, die dieses mehr oder weniger willkürlich festgelegte Spektrum genau nachmachen kann, erreicht rechnerisch die beste Farbwiedergabe; eine mit einer vollkommen »glatten« Verteilung der Wellenlängen (wie in Tabelle 1 und Tabelle 3 jeweils links) dagegen nicht, und Fachleute urteilen: »Von der Industrie wird der Index jedoch geschätzt, weil er auch Lampen mit bescheidener, weil lückenhafter spektraler Verteilung noch ganz passable R_a Werte um die 80 beschert. Nach unserer Erfahrung muss eine Lichtquelle hinsichtlich der subjektiven Farbwiedergabe-Bewertung schon sehr miserabel sein, um deutlich kleinere Zahlenwerte zu erreichen« (DIAL – der Beitrag wurde jedoch mittlerweile zurückgezogen). So ist die Skala derart zurecht gebastelt worden, dass sie nach unten offen ist und theoretisch wesentlich

Zur Bestimmung der Effizienz
in der Lichttechnik

weiter ins Negative als ins Positive reicht, während sie – nur allzu oft erfolgreich – den Eindruck einer Prozentskala von 0 bis 100 zu erwecken versucht.

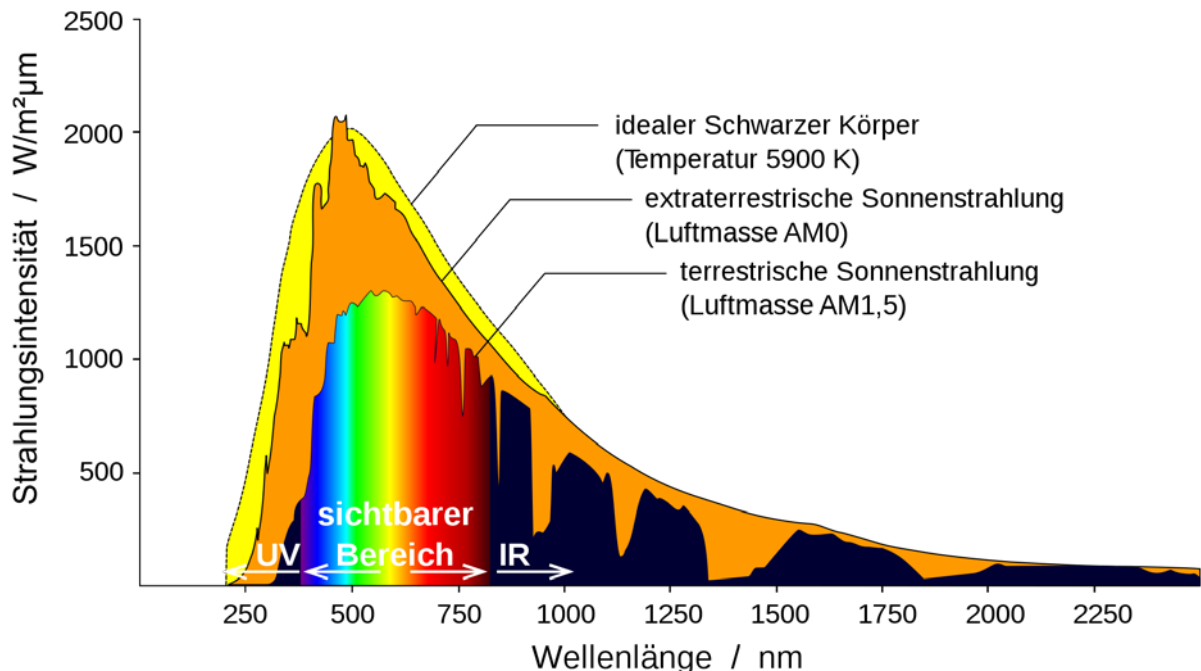


Bild 8: Spektren von Sonnenlicht und Tageslicht

(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/08/Sonne_Strahlungsintensitaet.svg/2000px-Sonne_Strahlungsintensitaet.svg.png)

Doch es gibt Hoffnung, dass sich dies allmählich ändert: »Die nordamerikanische IES (Illuminating Engineering Society) hat im Jahre 2015 einen Vorstoß in Richtung „Neuer Farbwiedergabeindex“ gewagt« – nicht perfekt, aber schon wesentlich besser.⁴ Nun bleibt nur noch zu hoffen, dass sich dieser auch durchsetzt.

Ergänzend muss hierzu noch angemerkt werden, dass sich die oben angegebenen theoretischen Maximal-Lichtausbeuten auf Tageshelligkeit beziehen, also auf das so genannte photopische Sehen. Beim skotopischen Sehen – bei Nacht – sind nicht nur alle Katzen grau, also kein Farbsehen möglich, sondern die größte Empfindlichkeit des Auges verschiebt sich auch noch ein wenig zum Blaugrün hin (507 nm – Bild 9). Die blaugrüne Katze ist also hellgrau, während rote und violette Katzen praktisch schwarz sind.

Darüber hinaus aber nimmt die Empfindlichkeit des Auges insgesamt noch einmal deutlich zu, sobald wir uns an die Dunkelheit gewöhnt haben. Bei einer Wellenlänge von 507 nm könnte sogar eine Lichtausbeute von 1700 lm/W erreicht werden, gäbe man sich denn mit einer Funzel zufrieden, die noch nicht einmal hell genug ist, um überhaupt irgendwelche Farben unterscheiden zu können, die aber ausschließlich auf dieser Wellenlänge leuchtet. Da sich dies jedoch kaum als »Beleuchtung« bezeichnen lässt, ist dieser Wert in der Lichttechnik von recht begrenzter praktischer Bedeutung. Die Spitze unserer Licht-Empfindlichkeit korreliert jetzt – bei Nacht, wenn Licht zu einem knappen Gut wird – aber genau mit der Spitze der Intensität des Sonnenlichts (Bild 9). Dies ist evolutionsgeschichtlich erst recht nahe liegend, denn auch Mondlicht kommt letztlich von der Sonne.

Zur Bestimmung der Effizienz in der Lichttechnik

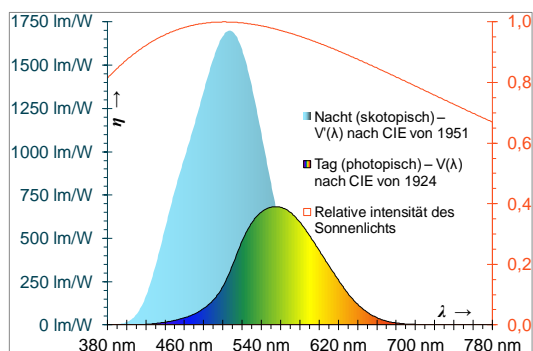


Bild 9: Empfindlichkeit des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts bei Tage (farbig) und bei Nacht (schwarz-weiß, hier blau schattiert dargestellt)

Somit hätte eine weiße Lichtquelle, die im technisch-physikalischen Sinn einen Wirkungsgrad von 100% erreicht, eine Lichtausbeute in der Gegend von 200 lm/W. Deutlich höhere Werte setzen zwangsläufig nicht nur einen fantastischen physikalischen Wirkungsgrad voraus, sondern müssen gleichzeitig mit einer sehr schlechten Farbwiedergabe einher gehen. Solche Lampen müssen also überproportional viel grünes Licht im Bereich um 555 nm bieten und im restlichen Bereich entsprechend »unterbelichtet« sein. Wer etwas anderes behauptet, muss wohl das »perpetuum lumile« erfunden haben – oder verkauft Wärmequellen, die als Abfallprodukt »leider« auch etwas Licht erzeugen.

8 Zusammenfassung – lichttechnische Größen im Überblick

| Lichttechnische Größen | | | | |
|------------------------|---------------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------|
| | Größe | Formelzeichen | Einheit | |
| | | | Name | Symbol |
| 1 | Wellenlänge | λ | Nanometer | nm |
| 2 | Lichtstrom | Φ | Lumen | lm |
| 3 | Lichtausbeute | η | Lumen pro Watt | lm/W |
| 4 | Lichtstärke | I_V | Candela | cd |
| | Beleuchtungsstärke | E_V | Lumen pro Quadratmeter | lm/m ² |
| | | | Lux | lx |
| | Leuchtdichte | L_V | Candela pro Quadratmeter | cd/m ² |
| | Reflexionsgrad | – | Prozent | % |
| Raumwinkel | Ω | Steradian | sr | |
| 5 | Ausstrahlungswinkel (Halbstreuwinkel) | ε | Grad (Bogenmaß) | ° (–) |
| 6 | Farbtemperatur | T | Kelvin | K |
| 7 | Farbwiedergabe-Index | R_a | – | – |

Tabelle 5: Zusammenstellung wichtiger lichttechnischer Größen

¹ Klaus Bieckmann: »Effizienz von LEDs: Die höchste Lichtausbeute einer weißen LED.« (<https://www.dial.de/article/effizienz-von-leds-die-hoechste-lichtausbeute-einer-weißen-led>)

² Stefan Fassbinder: »Anspruch und Wirklichkeit in der Lichttechnik-Werbung«. Elektropraktiker 10/2011, S. 828

³ <https://ledtipps.net/abstrahlwinkel/#abstrahlwinkel-rechner>

⁴ www.dial.de/de/article/tm-30-15-ein-neuer-farbwiedergabeindex